

# Abschätzung des Photovoltaik-Potentials auf Dachflächen in Deutschland

Martin Lödl(\*)<sup>1</sup>, Georg Kerber(\*)<sup>1</sup>, Prof. Dr. Rolf Witzmann<sup>1</sup>,  
Dr. Clemens Hoffmann<sup>2</sup>, Dr. Michael Metzger<sup>2</sup>

<sup>1</sup> TU München, Fachgebiet Elektrische Energieversorgungsnetze, Arcisstr. 21,  
80333 München, Deutschland, Tel. +49.89.289.22017, Fax: +49.89.289.25089,  
martin.loedl@mytum.de, <http://www.een.ei.tum.de>

<sup>2</sup> Siemens AG, Corporate Technology, Otto-Hahn-Ring 6, 81739 München, Deutschland,  
Tel.: +49.89.636.49720, Fax: +49.89.636.49767, michael.metzger@siemens.com

## **Kurzfassung:**

In der vorliegenden Arbeit werden die zur Stromerzeugung durch Photovoltaikanlagen wirtschaftlich nutzbaren Dachflächen in der Bundesrepublik Deutschland abgeschätzt. Dazu werden zunächst Gebäudegrößen verschiedener Regionen und Siedlungskategorien untersucht und die zur Verfügung stehenden Dachflächen abgeleitet. Darauf aufbauend kann die maximal installierbare Photovoltaik-Anlagenleistung für typische Gebäude, Netzgebiete oder Regionen angegeben und auf Bundesländer und Deutschland skaliert werden.

## **Keywords:**

Photovoltaik, Potential, Anlagenleistung, Dachflächen, Aufdachanlagen, Deutschland.

## **1 Einleitung**

Aufgrund des von der Politik in Deutschland geforderten Ausstiegs aus der Kernenergie und des wachsenden Energiebedarfs wird die Förderung des Ausbaus regenerativer Energien zunehmend wichtiger. Seit dem Inkrafttreten des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) im Jahr 2000 in Deutschland ist ein deutlicher Anstieg der Nutzung regenerativer Energien zu verzeichnen. 2008 betrug deren Anteil an der Stromerzeugung bereits 15,1 % [BMU-09]. Ziel der Bundesregierung ist es, diesen Anteil bis 2020 auf 30 % zu steigern. Großes Potential liegt hierbei in der Stromerzeugung durch Photovoltaik. Die Möglichkeit der dezentralen Energieeinspeisung durch einfache Montage auf Gebäudedächern trägt zum immer weiter fortschreitenden Ausbau der Photovoltaik bei.

Es existieren zwar bereits Abschätzungen der PV-Dachflächenpotentiale (bspw. [QUA-00]), diese allgemeinen Angaben sind jedoch nicht auf einzelne Netzgebiete oder Straßenzüge anwendbar. Für Aussagen zur Aufnahmefähigkeit von Niederspannungs-Verteilnetzen oder Untersuchungen zur mittelfristigen Entwicklung von Stromversorgungsnetzen müssen typische PV-Anlagengrößen bekannt sein.

Um für diesen Zweck eine Datengrundlage zu schaffen, wurden in der vorliegenden Arbeit die Gebäudegrößen verschiedener Regionen und Siedlungskategorien der Bundesrepublik Deutschland betrachtet. Aufbauend auf diesen Ergebnissen werden die zur Stromerzeugung

wirtschaftlich nutzbaren Dachflächen und die maximal installierbaren Photovoltaik-Anlagenleistungen für typische Gebäude und Netzgebiete berechnet. Für gesamtwirtschaftliche Betrachtungen wird das nutzbare PV-Potential auf Bundesländer und Deutschland skaliert.

## 2 Ermittlung des Dachflächen-Potentials in Netzbezirken

Zur Bestimmung des Photovoltaik-Dachflächenpotentials in Niederspannungsnetzen müssen einige Abschätzungen getroffen werden. Diese werden einzeln aufgeschlüsselt, um eine transparente und nachvollziehbare Ermittlung des PV-Potentials zu ermöglichen.

Potentiale auf Fassaden- und Freiflächen werden im Folgenden nicht einbezogen. Diese könnten als Erweiterung der ermittelten Potentiale noch ergänzt werden.

### 2.1 Ermittlung typischer Gebäudegrößen

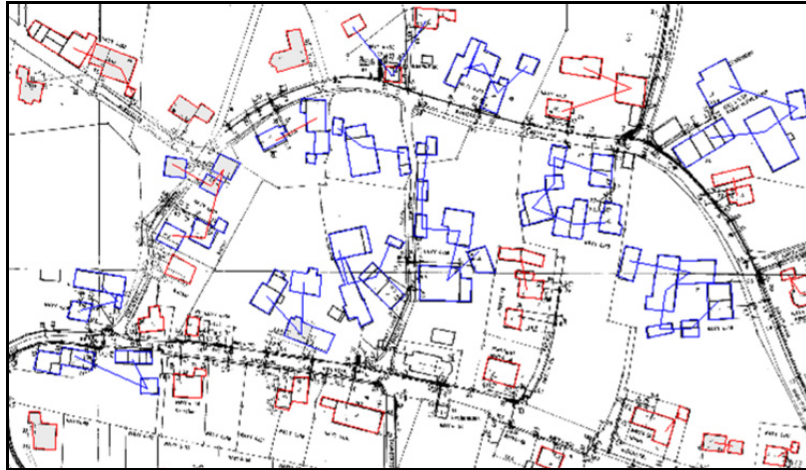
Umfassende Statistiken zu typischen Dachflächen und somit zu den zu erwartenden PV-Anlagengrößen existieren derzeit nicht. Um Aussagen zur Aufnahmefähigkeit von Niederspannungs-Verteilnetzen treffen oder Untersuchungen zur Entwicklung von Stromversorgungsnetzen durchführen zu können, wurden Dachflächen verschiedener Siedlungstypen und Regionen im Detail untersucht.

Ausgangspunkt bildeten 67 digitalisierte Flurkarten in den Siedlungskategorien Vorstadt, Dorf und ländliches Gebiet aus verschiedenen Regionen Bayerns (Datengrundlage vgl. [KER-08]). Beispiele für die jeweiligen Siedlungskategorien sind zur Verdeutlichung in Abbildung 1 dargestellt. Im gegebenen Kartenmaterial wurden am PC die Eckpunkte der Gebäude manuell markiert und so der Umriss des zu vermessenden Gebäudes nachgezeichnet.



**Abbildung 1:** Beispiele für die Siedlungskategorien Land (links), Dorf (mitte) und Vorstadt (rechts) [Bildquelle: Google Earth; 2007]

Die Vermessung unterscheidet zwischen Wohngebäuden und Landwirtschaften/Industrie (siehe Abbildung 2). Zu den privaten Wohnhäusern (rot) wurden Anbauten (z. B. Garagen), bei den Landwirtschaften/Industrien (blau) neben dem Wohnhaus auch Nebengebäude und weitere überdachte Hallen hinzugerechnet. In diese Kategorie wurden auch ehemalige Landwirtschaften oder andere Grundstücke mit besonders großen Gebäuden zugeordnet.



**Abbildung 2:** Markierung der Gebäudeumrisse zur Bestimmung der Gebäudegrundfläche

Die resultierenden, digital vorliegenden Gebäudeumrisse wurden von einem Matlab-Programm ausgelesen und ausgewertet. Aus den Daten wurde über den Maßstab der Flurkarte die Grundfläche der Gebäude getrennt nach den Typen Häuser (private Wohngebäude) und Landwirtschaften/Industrien (inkl. Wohnhäuser und Nebengebäude) berechnet.

### **2.1.1 Bestimmung der Gebäudegrundfläche**

Mithilfe des Verfahrens wurden mehr als 4.500 reale Gebäudegrundrisse vermessen und die Gebäudegrundflächen pro Hausanschluss berechnet. Getrennt nach den Kategorien Vorstadt, Dorf und Land stehen die ermittelten Werte der Gebäudegrundfläche und die Zuordnungen zu den Kategorien Haus oder Landwirtschaft zur Verfügung.

Für typische Vorstadt-Gebiete wurden die Gebäudegrundflächen von 16 Netzgebieten mit insgesamt 2.138 Hausanschlüssen bestimmt. Hierbei überwiegt ein großer Anteil an Reihenhaussiedlungen. Die Gebäudegrundfläche pro Hausanschluss fällt in diesem Siedlungstyp geringer als in Dorf- und Land-Gebieten aus. Es existieren hier einige größere Ein- und Mehrfamilienhäuser, Landwirtschaften und Industriebetriebe mit großem Dachflächenpotential sind in dieser Netzkategorie jedoch vernachlässigbar.

Bei den Dorf-Verteilnetzen konnten 14 Flurkarten mit 1.551 Hausanschlüssen (1.296 Wohngebäude und 255 Landwirtschaften) vermessen werden. Die Wohngebäude sind meist Zweifamilienhäuser. Landwirtschaften und Industrie sind vorhanden und machen anteilig meist weniger als ein Drittel der Hausanschlüsse aus (vgl. 2.2.2).

Bei den Land-Verteilnetzen wurden 37 Gebiete ausgewertet. Dabei wurden 292 Hausanschlüsse für Wohngebäude und 285 für Landwirtschaften gezählt. Flächenmäßig große landwirtschaftliche Hallen prägen das Landschaftsbild. Besonders bei kleinen Netzen mit wenigen Anschlüssen überwiegt der Anteil der Landwirtschaften. Mit zunehmender Anzahl der Hausanschlüsse dominieren die Wohnhäuser. Deren Grundfläche ist größer als in typischen Dorf- und Vorstadtgebieten.

Abbildung 3 zeigt die Summenhäufigkeitsverteilungen der Gebäudegrundflächen für private Wohnhäuser (links) bzw. Landwirtschaften/Industrie (rechts) für die verschiedenen Siedlungskategorien. Die in vorstädtischen Gebieten dominierenden Reihenhäuser weisen

eine geringe Grundfläche auf, was zu einem steilen Anstieg der Verteilungsfunktion von Wohngebäuden führt. Im ländlichen Raum überwiegen größere Gebäude. Dörfer liegen in Bezug auf die Grundfläche zwischen Land und Vorstadt. Der Unterschied der Gebäudegrundflächen bei Landwirtschaften ist nicht signifikant.

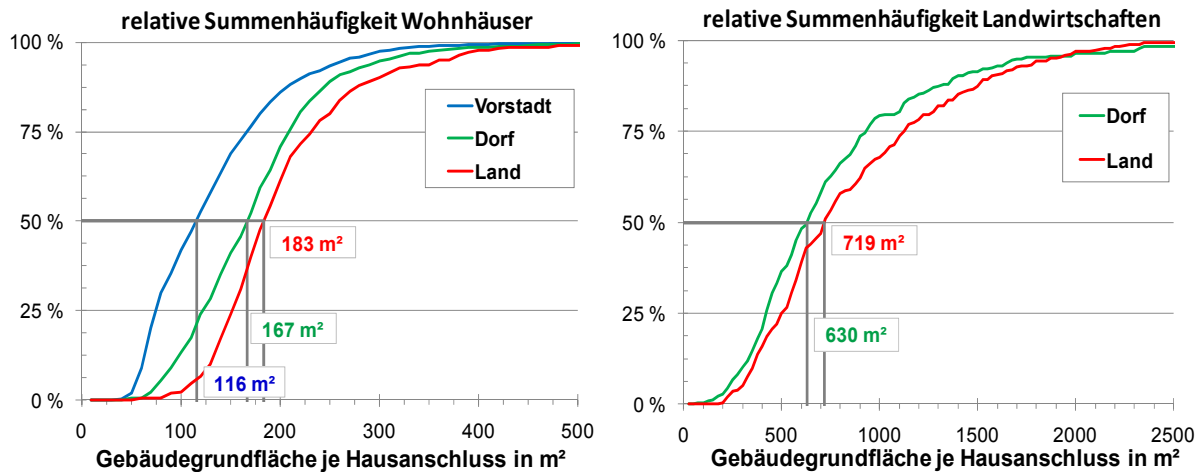


Abbildung 3: Relative Summenhäufigkeit und Median der Gebäudegrundflächen

Die bei der Vermessung der Gebäudegrundflächen ermittelten Ergebnisse stimmen gut mit Literaturwerten überein. [SCH-02] gibt als Anhaltswerte für die Gebäudegrundfläche von Streusiedlungen im Land- und Dorfbereich je Wohneinheit ca. 175 m<sup>2</sup>, in Siedlungen 95 m<sup>2</sup> - 135 m<sup>2</sup> an. Für Landwirtschaften/Industrien existieren keine direkt vergleichbaren Daten.

### 2.1.2 Betrachtung der Vermessungsfehler

Die Vermessung ist mit Fehlern behaftet. Dies führt dazu, dass die ermittelten Ergebnisse nicht genau der Realität entsprechen können. Die wesentlichen Fehlerursachen sind:

- Die Gebäudeumrisse müssen möglichst genau nachgezeichnet werden. Teilweise ist jedoch eine hohe Zeichengenauigkeit aufgrund qualitativ minderwertiger Netzpläne nicht gewährleistet. Zudem sind die Pläne nicht immer aktuell.
- Bei Gebäuden müssen runde Anbauten durch Geradenstücke angenähert werden, wodurch Näherungsfehler entstehen.
- Da die Netzpläne teilweise digital vorlagen, stimmt der Maßstab des Originalplans möglicherweise nicht mehr exakt mit den ursprünglich vorgegebenen Werten überein.

Zu groß bzw. zu klein markierte Grundflächen (Fehler a und b) treten in etwa gleich häufig auf, sodass der resultierende mittlere Fehler vernachlässigbar ist. Um Fehler c zu minimieren, wurden für jeden Netzplan einige markante Umrisse mit exakten Werten des "Bayern Viewers", einem Service der Bayerischen Vermessungsverwaltung, verglichen und so der exakte Maßstab ermittelt. Weitere Korrekturen sind daher nicht erforderlich.

### 2.1.3 Grund- und Freiflächen

Da für die späteren Abschätzungen die Grund- und Freiflächen von Wohn- sowie gewerblichen und industriellen Gebieten benötigt werden, wurden diese ebenfalls vermessen. Neben den Grundflächen der Gebäude zählen dazu auch unbebaute Flächen für Hofräume, Zufahrten, Lagerplätze, Vorgärten, Erholungs-/Grünflächen und Spielplätze. Bei gewerblicher Nutzung werden zum Betriebsgelände neben dem Verwaltungsgebäude und der Freifläche auch Stellplätze, Lagerflächen und Werkstraßen gerechnet.

Aus der Vermessung ergeben sich mittlere Flächen pro Hausanschluss, die in Tabelle 1 aufgeführt sind. Die Angaben können nicht mit mittleren Grundstücksabmessungen verglichen werden, da auch Gewerbe- und Erholungsflächen mit einbezogen werden.

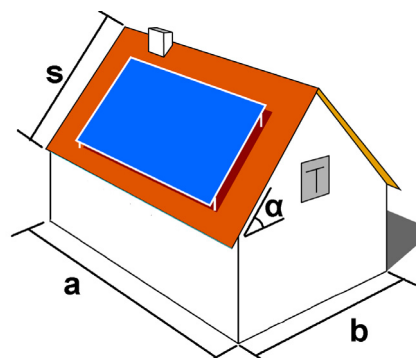
**Tabelle 1:** Grund- und Freiflächen in den Siedlungs-Kategorien

Siedlungs-Kategorie	Land	Dorf	Vorstadt
Mittlere Grund- und Freifläche pro Hausanschluss in m <sup>2</sup>	3.734	1.793	795

### 2.1.4 Berechnung des Dachflächen-Potentials

#### Steildächer

Im Wohnbereich treten fast ausschließlich Rechteck-/Bungalow-Bauten mit Steildächern auf [SCH-92]. Aus der Gebäudegrundfläche lässt sich bei Steildächern über den Neigungswinkel  $\alpha$  die Dachfläche ermitteln (Abbildung 4). Die vorwiegend anzutreffende Dachneigung liegt zwischen 20° und 50° [SCH-02]. Zur weiteren Berechnung wird als Mittelwert der Dachneigung  $\alpha = 35^\circ$  [KAL-93] gewählt.



**Abbildung 4:** Veranschaulichung zur Ermittlung der Dachfläche bei Steildächern

Für den Dachneigungswinkel gilt:

$$\cos \alpha = \frac{1}{2} b \cdot \frac{1}{s} \quad (\text{Gl. 1})$$

Es wird davon ausgegangen, dass nur die jeweils südlicher ausgerichtete Dachseite mit Photovoltaik-Modulen bestückt wird. Zugelassen werden Ausrichtungen  $\pm 90^\circ$  um die exakte Südlage. Die Dachfläche einer Seite wird berechnet aus

$$A_D = a \cdot s \quad (\text{Gl. 2})$$

wobei  $a$  die Länge der Traufseite und  $s$  die Länge des Ortgangs ist.

Durch Dacheinbauten wie Kamine, Antennen, Dachfenster, Gauben und Lüftungsschächte und die dazu notwendigen Abstände, aber auch durch denkmalgeschützte Gebäude reduziert sich die nutzbare Dachfläche. Zur Abschätzung wird dafür ein Reduktionsfaktor  $\rho = 0,80$  [SCH-02] eingeführt.

$$A_{D,Nutz} = A_D \cdot \rho \quad (\text{Gl. 3})$$

Aus Gl. 3 ergibt sich mit der Gebäudegrundfläche  $A_{GGF}$  (Gl. 4) die für Photovoltaik nutzbare Dachfläche  $A_{PV,Nutz}$  nach Gl. 5. Dabei werden eine dachparallele Montage der PV-Module sowie eine statische Gleichverteilung der Gebäudeausrichtungen angenommen.

$$A_{GGF} = a \cdot b \quad (\text{Gl. 4})$$

$$A_{PV,Nutz} = \frac{1}{2} A_{GGF} \cdot \rho \cdot \frac{1}{\cos \alpha} \quad (\text{Gl. 5})$$

Mit dem Dachneigungswinkel  $\alpha = 35^\circ$  ergibt sich die nutzbare Dachfläche  $A_{PV,Nutz}$  nach Gl. 6:

$$A_{PV,Nutz} = 0,488 \cdot A_{GGF} \quad (\text{Gl. 6})$$

Zur weiteren Abschätzung wird ein leicht gerundeter Wert für  $A_{PV,Nutz}$  verwendet:

$$A_{PV,Nutz} \approx 0,5 \cdot A_{GGF} \quad (\text{Gl. 7})$$

### Flachdächer

Bei landwirtschaftlichen Hallen sowie mittleren und großen Industriegebäuden sind häufig Flachdächer vorzufinden. Die PV-Module werden dort zur optimalen Ausnutzung der solaren Einstrahlung aufgeständert. Zur Vermeidung von Verschattung zwischen den Modulreihen wird abhängig vom Neigungswinkel zwischen den Modulreihen unterschiedlich großer Abstand eingehalten. Sinnvoll ist ein Verhältnis von nutzbarer PV-Fläche zu gesamter Dachfläche von ca. 0,5 [HUE-95]. Reduktionen durch Dachaufbauten werden darüber hinaus nicht berücksichtigt. Der daraus resultierende Fehler ist aufgrund des geringen Anteils der Flachdächer am gesamten Gebäudebestand [QUA-00] minimal. Somit gilt für Flachdächer:

$$A_{PV,Nutz} = 0,5 \cdot A_{GGF} \quad (\text{Gl. 8})$$

## 2.2 Ermittlung typischer Photovoltaik-Anlagenleistungen

### 2.2.1 Photovoltaik-Anlagenleistung

Zur Berechnung der Photovoltaik-Anlagenleistung wird die Dachfläche mit der spezifischen Leistung der Photovoltaik-Module multipliziert. Diese kann für zukünftig zu erwartende Anlagen im Mittel mit ca.  $150 \text{ W}_{el}/\text{m}^2$  angesetzt werden [COR-06].

Aus den gewonnenen Gebäudegrundflächen für die einzelnen Siedlungs-Kategorien und der Herleitung zur Bestimmung des Dachflächenpotentials lässt sich nun das wirtschaftlich nutzbare Photovoltaik-Potential für Aufdachmontage bestimmen. Das mittlere PV-Potential für Wohnhäuser und Landwirtschaften/Industrie in den verschiedenen Siedlungs-Kategorien ist in

Tabelle 2 dargestellt.

**Tabelle 2:** Mittlere Gebäudegrundflächen und PV-Potentiale der Siedlungs-Kategorien

Siedlungs-Kategorie	Land	Dorf	Vorstadt
Grundfläche in $\text{m}^2$ Wohngebäude	183	167	116
PV-Potential in kWp Wohngebäude	13,7	12,5	8,7
Grundfläche in $\text{m}^2$ Landwirtschaften	719	630	-
PV-Potential in kWp Landwirtschaften	53,9	47,3	-

### 2.2.2 Anteil der Landwirtschaften

Landwirtschaften und Industriebetriebe spielen beim Zubau von dachmontierten Photovoltaikanlagen eine besondere Rolle. Durch große Dachflächen ergibt sich ein großes Potential für regenerative Energieerzeugung. In den vorhergehenden Untersuchungen wurde die Anzahl der Hausanschlüsse für Wohnhäuser und Landwirtschaften/Industrien für jedes vermessene Gebiet separat erfasst.

Die Anzahl der Landwirtschaften über der Gesamtzahl der Hausanschlüsse ist in Abbildung 5 dargestellt. In kleineren ländlichen Gebieten zählen teilweise 100 % der Hausanschlüsse zu Landwirtschaften. Bei größeren Siedlungen stagniert die Anzahl der Höfe. Dies ist plausibel, da in den letzten Jahrzehnten kaum Landwirtschaften neu gegründet wurden. Stattdessen entwickeln sich um den bisherigen Dorfkern fast ausschließlich neue Wohnsiedlungen. In städtischen Gebieten sind keine Landwirtschaften vorhanden.

Durch grafische Auswertung der Abbildung 5 können für beliebige Netze mit der jeweils vorgegebenen Anzahl an Hausanschlüssen die Anteile der Wohnhäuser und Landwirtschaften ermittelt werden.



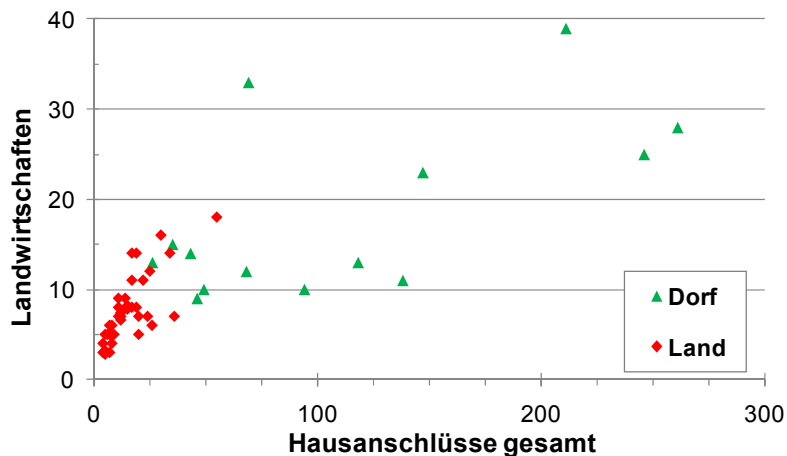


Abbildung 5: Anteil der Hausanschlüsse für Landwirtschaften in den Kategorien Land und Dorf

### 2.2.3 Abschlag für solarthermische Nutzung

Die ermittelten Dachflächen können anstelle von Photovoltaikmodulen auch mit Solarkollektoren zur Brauchwassererwärmung und Heizungsunterstützung belegt werden. Durch die Konkurrenz zwischen beiden Nutzungsformen reduziert sich nach [QUA-00] das nutzbare Potential für PV-Anlagen deutschlandweit um 34 %.

## 2.3 Photovoltaik-Potential in Niederspannungs-Verteilnetzen

Aufbauend auf den durchschnittlichen Photovoltaik-Anlagenleistungen kann unter Berücksichtigung der Anzahl der Hausanschlüsse und des Anteils der landwirtschaftlichen Grundstücke das nutzbare Photovoltaik-Potential in verschiedenen Verteilnetzen bestimmt werden. Als Grundlage dienen dazu die aus der statistischen Netzanalyse in [KER-08] gewonnenen Referenznetze. Der durch solarthermische Anlagen nicht zur Verfügung stehende Dachflächen-Anteil wurde im Folgenden bereits abgezogen.

In ländlichen Gebieten mit wenigen Hausanschlüssen ist durch die dort vorhandenen Landwirtschaften großes Photovoltaik-Potential vorhanden. Je nach betrachtetem Referenznetz sind insgesamt Photovoltaikanlagen mit einer Leistung zwischen ca. 200 kWp und 330 kWp je Netzgebiet möglich. In Dörfern nehmen zwar die vorhandenen Gebäude zu, allerdings verringert sich relativ dazu die Zahl der Landwirtschaften. Zusammen existieren Dachflächen für ein PV-Potential von ca. 800 kWp in einem Netzgebiet. In städtischen Bereichen sind keine Landwirtschaften vorhanden. Das nur auf Wohnhäusern bereitstehende PV-Potential ist deshalb trotz der großen Zahl an Hausanschlüssen mit 830 kWp pro Transformator nicht wesentlich größer als in Dorf-Verteilnetzen.

In Tabelle 3 sind die daraus resultierenden mittleren PV-Potentiale je Hausanschluss unter Berücksichtigung des Anteils der Landwirtschaften angegeben.

Tabelle 3: Mittleres Photovoltaikpotential in den Siedlungs-Kategorien

Siedlungs-Kategorie	Land	Dorf	Vorstadt
Mittleres PV-Potential pro Hausanschluss in kWp	25,8	13,9	5,7



### 3 Abschätzung des Photovoltaik-Dachflächenpotentials in Bayern und Deutschland

Um mit den ermittelten Potentialen eine Angabe für Deutschland abschätzen zu können, müssen die zugrunde gelegten Flurkarten in Beziehung mit bayern- und deutschlandweiten statistischen Daten gesetzt werden.

#### 3.1 Photovoltaik-Potential in Bayern

Als Basis für die Hochrechnungen der netzbezogenen PV-Potentiale auf Bayern wurden Daten des Bayerischen Landesamts für Statistik und Datenverarbeitung [GEN-09] zur

- „Flächenerhebung in Bayern nach Art der tatsächlichen Nutzung“
- „Flächenerhebung in Bayern nach Art der geplanten Nutzung“
- dem „Bevölkerungsstand“ sowie
- dem „Bestand an Wohngebäuden und Wohnungen in Bayern“

ausgewertet. Dort sind Daten aller Gemeinden bzw. Städte einzeln aufgeführt.

Für die Hochrechnung der Dachflächenpotentiale ist eine Zuordnung der in den Statistiken erfassten Städte und Gemeinden zu den Siedlungskategorien erforderlich. Eine strikte Trennung zwischen Land, Dorf und Stadtgebieten kann in der Praxis nicht eingeführt werden, da die Übergänge meist fließend sind.

Durch die Auswirkungen der Gebietsreform in Bayern (1971 - 1980) ist die Zuordnung zudem erschwert. Dabei wurden kleinere Siedlungen eingemeindet und Großgemeinden gebildet [SCH-92]. Bei den vorliegenden Statistiken ist es deshalb wahrscheinlich, dass in einer Gemeinde Gebiete mit unterschiedlichen Bebauungs- bzw. Siedlungsstrukturen vorzufinden sind.

##### 3.1.1 Einteilung der bayrischen Städte und Gemeinden

Eine reine Einteilung bspw. nach der Bevölkerungsdichte oder Wohnungsverteilung einer Gemeinde erscheint nicht sinnvoll. Einzelne Eigenschaften stellen keinen direkten Bezug zur Kategorisierung dar. Sie können nur Hinweise auf Verdichtungsstrukturen geben. Zur Kategorisierung der 2.056 bayrischen Städte und Gemeinden werden deshalb mehrere Kriterien einbezogen:

- Einwohnerzahl ([SCH-92]):

Landgemeinde	bis 2.000 Einwohner
Dorf	bis 5.000 Einwohner
Kleinstadt	bis 20.000 Einwohner
Mittel- und Großstadt	ab 20.000 Einwohner
- Einwohnerdichte (Einwohner pro Gemeindefläche; nach [SCH-92]):

Ländliche Region	bis 100 Einwohner/km <sup>2</sup>
Verdichtungsansätze (Dorf)	bis 300 Einwohner/km <sup>2</sup>
Verdichtungsraum (Stadt)	ab 300 Einwohner/km <sup>2</sup>

- Siedlungsfläche:  
Zur Siedlungsfläche zählen Gebäude- und Freiflächen für Wohnen und Gewerbe, Betriebsflächen (ohne Abbauland) sowie Friedhofs- und Erholungsflächen inkl. Grünanlagen:

Ländliche Region	bis 40 ha
Dörfliche Region	bis 80 ha
Verstädterte Region	bis 150 ha
Stadt	ab 150 ha
- Anteil der Wohnungen pro Wohngebäude (nach [MUE-99]):

Ländliche Region	bis 1,4
Dörfliche Region	bis 1,6
Verstädterte Region	bis 1,8
Stadt	ab 1,8
- Wohnfläche pro Person (nach [MUE-99]):

Ländliche Region	mehr als 48 m <sup>2</sup> /Person
Dörfliche Region	mehr als 45 m <sup>2</sup> /Person
Kleinstadt	mehr als 42 m <sup>2</sup> /Person
Mittel- und Großstadt	weniger als 42 m <sup>2</sup> /Person

Weitere mögliche Kriterien zur Einteilung sind:

- Siedlungsdichte (Einwohner pro Siedlungsfläche)
- Wohnungsdichte (Wohnungen pro Siedlungsfläche)
- Wohngebäudedichte (Wohngebäude pro Siedlungsfläche)
- Geschossflächenzahl (Geschossfläche pro Grundstücksfläche)
- Grundflächenzahl (Grundfläche pro Grundstücksfläche)

Zu Geschoss- und Grundflächenzahlen stehen keine statistischen Daten zur Verfügung. Sie können folglich nicht zur Auswertung herangezogen werden. Bei einer Sortierung nach Siedlungs-, Wohnungs- oder Wohngebäudedichte traten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Regionen auf.

Die genannten Eigenschaften werden einzeln bewertet und die Städte und Gemeinden so für jedes Kriterium in eine der genannten Klassen eingruppiert. Anschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst. Jede Stadt und Gemeinde in Bayern wird der Kategorie zugeordnet, für die sie die meisten Übereinstimmungen erhalten hat.

Nach dieser Auswertung ergibt sich eine Aufteilung in Klassen, die Tabelle 4 zu entnehmen ist. Angegeben sind neben der Anzahl der Städte bzw. Gemeinden, die in eine Kategorie fallen, die Summen aller Einwohner und die Summen der Siedlungsflächen je Klasse. Derzeit noch nicht bebaute aber als Bauland ausgewiesene Grundstücke werden bereits mit einbezogen. Zur Bestimmung des PV-Potentials werden diese Flächen mit berücksichtigt.

**Tabelle 4:** Einteilung bayrischer Städte und Gemeinden in Siedlungs-Kategorien (Stand: 2007)

Siedlungs-Kategorie	Land-Gemeinde	Dorf	Kleinstadt	Mittel- und Großstadt
<b>Anzahl</b>	550	999	367	140
<b>Einwohner</b>	740.932	3.215.814	3.023.437	5.535.548
<b>Siedlungsfläche in km<sup>2</sup></b>	406	1.549	1.149	1.201

### 3.1.2 Photovoltaik-Potential

Die so ermittelten statistischen Daten geben Aufschluss über die Anzahl der Wohngebäude in Bayern. Jedoch ist nicht bekannt, welches Verhältnis für Gebäudezahl zu Anzahl der Hausanschlüsse anzusetzen ist. Zudem fehlen Angaben über Landwirtschafts-, Gewerbe- und Industriegebäude.

Zur Skalierung wurden deshalb die Grund- und Freiflächen der ausgewerteten Flurkarten (vgl.

Tabelle 1) mit den statistischen Ergebnissen verglichen und so die Anzahl der Hausanschlüsse je Siedlungskategorie ermittelt. Mit den in Tabelle 2 angegebenen PV-Potentialen erfolgt die Hochrechnung der Anlagenleistung auf Bayern.

Bei Mittel- und Großstädten ist, anders als in den anderen Regionen, von unterschiedlichen Siedlungsstrukturen auszugehen. Vororte weisen andere Bebauungsdichten als der Stadtkern auf. Dazu werden vereinfacht ringförmige Siedlungsstrukturen in konzentrischen Kreisen um den Stadtmittelpunkt angenommen [HUE-95]. Das äußere Umland wird der Kategorie Vorstadt zugeordnet. Dafür wird ein Flächenanteil von 25 % der Siedlungsfläche des Stadtgebiets angesetzt. Für die im Stadtkern vorhandenen Dachflächen wurden in dieser Arbeit keine Potentialabschätzungen erstellt. Das dort möglicherweise existierende PV-Potential wird im Folgenden nicht weiter betrachtet und deshalb zu null gesetzt.

Abzüglich der Flächen, die durch Nutzung für Solarkollektoren zur Brauchwassererwärmung und Heizungsunterstützung nicht für PV-Anlagen zur Verfügung stehen, ergibt sich in Bayern ein PV-Potential von 25,3 GWp (vgl. Tabelle 5).

**Tabelle 5:** PV-Potential auf Dachflächen in Bayern

Siedlungs-Kategorie	PV-Potential in GWp
<b>Land</b>	2,8
<b>Dorf</b>	12,0
<b>Kleinstadt</b>	8,3
<b>Mittel- und Großstadt</b>	2,2
<b>Summe Bayern</b>	25,3

### 3.2 Photovoltaik-Potential in Deutschland

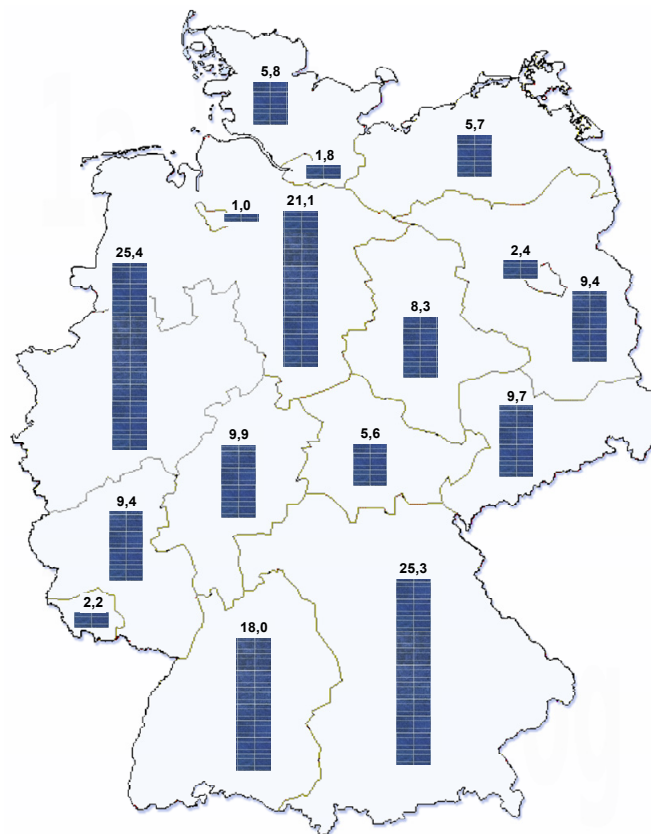
Deutschlandweit stehen die für Bayern verwendeten statistischen Daten auf Städte- und Gemeinde-Ebene nicht zur Verfügung. Das Vorgehen wird daher abgeändert und die vom Statistischen Bundesamt veröffentlichten Bauflächen für jedes Bundesland verwendet. Darin sind alle Flächen zusammengefasst, die überwiegend für

- Wohngebäude inkl. zugehöriger Freifläche,
- Gewerbebetriebe einschließlich Lagerhäuser und Lagerplätze,
- land- und forstwirtschaftliche Betriebe,
- Einkaufszentren und Messen sowie Geschäfts- und Bürogebäude,
- Gaststätten,
- Hochschul-, Klinik- und Hafengebäude sowie
- Grundstücke zur Erholung

genutzt werden oder zu deren Nutzung vorgesehen sind [GEN-09].

Zur Skalierung des PV-Potentials wird das Verhältnis der Bauflächen von Bayern und Deutschland gebildet. Alle angegebenen Bauflächen für Bayern ergeben 4.400 km<sup>2</sup>. Für Deutschland beträgt die Bebauungsfläche 27.634 km<sup>2</sup>. Abzüglich des Anteils für solarthermisch genutzte Dachflächen ergibt sich in Deutschland damit ein Dachflächen-Potential für Photovoltaikanlagen von 161 GWp.

Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 6 für jedes Bundesland das geschätzte Photovoltaik-Potential eingetragen. Die Werte wurden analog zu obiger Hochrechnung über das Verhältnis der Bauflächen jeden Bundeslandes zur Baufläche in Deutschland ermittelt.



**Abbildung 6:** Geschätztes PV-Potential in Deutschland je Bundesland (Angaben in GWp)

Andere Abschätzungen erhalten Dachflächenpotentiale in derselben Größenordnung. Kaltschmitt/Wiese ermittelten bspw. eine mögliche Anlagenleistung im Bereich von 53 bis 116 GWp [KAL-93]. Prof. Quaschnig gibt ein PV-Potential von ca. 130 GWp an [QUA-00]. Es ist anzunehmen, dass die Differenz aus teilweise unterschiedlichen Annahmen und Datengrundlagen in den beiden anderen Untersuchungen resultiert. Die grundsätzliche Übereinstimmung kann jedoch als Validierung des gezeigten Vorgehens verstanden werden.

### 3.3 Unsicherheiten bei der Abschätzung

Bei der Ermittlung der Dachflächen und Skalierung der Ergebnisse wurden Annahmen und Abschätzungen getroffen. Diese sind möglicherweise nicht für alle Regionen Deutschlands zutreffend. Die Berechnungen sind deshalb mit Unsicherheiten behaftet:

- Bei der Bestimmung des mittleren Photovoltaik-Potentials je Hausanschluss wurden Annahmen getroffen, die für einige Regionen nicht zutreffend erscheinen können. Die Anteile für solarthermisch genutzte Dachflächen und der angegebenen Reduktionsfaktor könnten durch neuere Untersuchungen angepasst werden.
- Eine exakte Kategorisierung der bayrischen Städte und Gemeinden ist aufgrund der Gebietsreform nicht mehr möglich.
- Unterschiedliche Siedlungsstrukturen in den Bundesländern werden durch die angewendete Hochrechnung nicht näher betrachtet.
- Alle Ausrichtungen und Standorte werden als gleich wirtschaftlich erachtet. Auf die Wirtschaftlichkeit der Photovoltaikanlagen durch unterschiedliche Dachflächenausrichtung und Einstrahlungsverteilungen wird nicht eingegangen.
- Für Kerngebiete von Mittel- und Großstädten wird kein separates PV-Potential ausgewiesen. Das Potential in Gewerbe- und Industriegebieten könnte im Detail analysiert werden.

Die Unsicherheiten der ermittelten Photovoltaik-Potentiale für Bayern und Deutschland können qualitativ nicht exakt ermittelt werden. Die Unsicherheit wird in den einzelnen Siedlungskategorien auf ca. 5 - 10 % geschätzt. Prinzipbedingt vergrößern sich diese durch die Hochrechnung. Sie werden aber aufgrund des Vergleichs mit anderen Arbeiten zu < 20 % angenommen.

## 4 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden die zur Stromerzeugung durch Photovoltaikanlagen wirtschaftlich nutzbaren Dachflächen in der Bundesrepublik Deutschland abgeschätzt. Für verschiedene Regionen und Siedlungskategorien wurden dazu typische Gebäudegrößen untersucht und die zur Verfügung stehenden Dachflächen abgeleitet. In ländlichen Gebieten ist durch die dort vorhandenen Landwirtschaften großes Photovoltaik-Potential vorhanden. In Dörfern nehmen zwar die vorhandenen Gebäude zu, allerdings verringern sich sowohl die Zahl der Landwirtschaften als auch typische Gebäudegrößen. Im städtischen Bereich sind keine Landwirtschaften mehr vorhanden. Das nur auf Wohnhäusern bereitstehende PV-Potential ist deshalb trotz der größeren Anzahl an Häusern nicht wesentlich größer als in einem typischen Dorf-Verteilnetz.

Die in dieser Arbeit quantifizierten Ergebnisse können u.a. verwendet werden, um verlässliche Aussagen über die Aufnahmefähigkeit von Niederspannungs-Verteilnetzen oder die Entwicklung von Stromversorgungsnetzen zu treffen.

Unter Berücksichtigung der Konkurrenz von Photovoltaikanlagen und thermischen Solarkollektoren stehen in Bayern nach der Abschätzung wirtschaftlich nutzbare Dachflächen bereit, um dort Photovoltaikanlagen mit einer Leistung von insgesamt ca. 25 GWp zu installieren. Deutschlandweit wird das Dachflächenpotential für Photovoltaik-Anlagen auf ca. 161 GWp geschätzt. Dies stimmt weitestgehend mit anderen Werten aus der Literatur überein. Die Ende 2008 installierte Anlagenleistung von ca. 6 GWp [PHO-09] in Deutschland entspricht daher, ohne Berücksichtigung des Anteils der Freiflächenanlagen, etwa 4 % des möglichen Potentials.

## 5 Literatur

- [BMU-09] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: *Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2008*; Juni 2009
- [COR-06] Corradini, Roger; Wagner, Ulrich: *Ganzheitliche Analyse von zukünftigen Photovoltaik-Systemen*; "Technik in Bayern", 02/2006, 03/2006
- [GEN-09] Genesis online: *Das statistische Informationssystem des Bundes und der Länder*; <http://www.regionalstatistik.de>
- [HUE-95] Hübert, Michael: *Großflächige Einbindung dezentral verteilter Photovoltaikanlagen in regionale Energieversorgungssysteme*; Paderborn, 2007
- [KAL-93] Kaltschmitt, Martin; Wiese, Andreas (Hrsg.): *Erneuerbare Energieträger in Deutschland, Potentiale und Kosten*; Springer Verlag Berlin, 1993
- [KER-08] Kerber, Georg; Witzmann, Rolf: *Statistische Analyse von NS-Verteilungsnetzen und Modellierung von Referenznetzen*; ew, Jg. 107 (2008), Heft 6, S. 22 - 26
- [MUE-99] Müller, Wolfgang; Korda, Martin (Hrsg.): *Städtebau*; Teubner Verlag, Stuttgart, 4. Auflage, 1999
- [PHO-09] Photon Europe GmbH: *PV Statistik 2008*; 2009
- [QUA-00] Quaschnig, Volker: *Systemtechnik einer klimaverträglichen Elektrizitätsversorgung in Deutschland für das 21. Jahrhundert*; VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 2000
- [SCH-02] Scheffler, Jörg: *Bestimmung der maximal zulässigen Netzanschlussleistung photovoltaischer Energiewandlungsanlagen in Wohnsiedlungsgebieten*; TU Chemnitz, 2002
- [SCH-92] Schilling, Michael: *Raum- und Siedlungsstrukturmodell zur vereinfachten Beschreibung der räumlichen Verteilung photovoltaisch nutzbarer Flächen*; Fachgebiet Elektrische Energieversorgung, Universität-Gesamthochschule Paderborn, 1992
- [STA-96] Staiß, Frithjof: *Photovoltaik; Technik, Potentiale und Perspektiven der solaren Stromerzeugung*; Vieweg, Wiesbaden, 1996